

## Etude des transformations des ondes longues en présence d'ouvrage de haut de plage en conditions de tempête

Emilie WOUSSEN<sup>1</sup>, Kevin MARTINS<sup>2</sup>, Olivier BURVINGT<sup>1</sup>,  
Vincent MARIEU<sup>1</sup>, Nadia SENECHAL<sup>1</sup>

1. Université de Bordeaux, UMR CNRS 5805 EPOC. Allée Geoffroy Saint-Hilaire CS 50023, 33615 Pessac, France.

[emilie.woussen@u-bordeaux.fr](mailto:emilie.woussen@u-bordeaux.fr)

2. Université de la Rochelle, UMR 7266 LIENSs. 2 rue Olympe de Gouges, La Rochelle 17000, France.

### Résumé :

En zone littorale, l'énergie des vagues se répartit majoritairement sur deux bandes fréquentielles, les bandes « gravitaire » (G) (habituellement fréquence  $f > 0.05$  Hz) et « infragravitaire » ( $f < 0.05$  Hz). La bande G correspond aux vagues incidentes et est caractérisée principalement par des processus de dissipation d'énergie associés au déferlement des vagues, transferts d'énergie non-linéaires et parfois des phénomènes de réflexion en présence d'ouvrage. La bande IG, principalement associée à des groupes de vagues incidentes, peut quant à elle sous certaine condition dominer l'hydrodynamique à l'interface terre/mer en raison de sa faible dissipation d'énergie. Malgré l'intérêt continu de la communauté scientifique, les processus de transformation des ondes IG, surtout sous conditions énergétiques, restent mal compris. Leur compréhension est cruciale pour anticiper les risques littoraux le long des côtes aménagées. Dans cette étude, nous nous intéressons aux processus de transformation des ondes IG en haut de plage sur la plage centrale de Lacanau Océan et l'impact que peut notamment avoir la présence d'enrochement. Nous nous appuyons sur une campagne in situ ayant eu lieu en Novembre 2022, pendant six cycles de marée et lors de conditions énergétique ( $H_{m0} \sim 6$  m au large). Ces données expérimentales sont complétées par des simulations numériques effectuées via le modèle XBeach en 2D (mode SurfBeat). Les différentes paramétrisations de ces simulations numériques (choix de bathymétrie, modélisation du déferlement, etc...) sont abordées, afin d'étudier par la suite les transformations (génération, dissipation et réflexion) des ondes longues en présence d'ouvrages (de type enrochement) et plus généralement, leurs interactions en conditions de tempête.

**Mots-clés :** Ondes infragravitaires, Plage, XBeach 2D, Ouvrages de protection (enrochements), Réflexion, Conditions énergétiques.

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

### 1. Introduction

En zone littorale, l'énergie des vagues se répartit majoritairement sur deux bande fréquentielles, caractérisées par des processus de génération et transformation distincts. Les vagues incidentes (houle et mer de vent), dans la bande dite "gravitaire" (G), ont des fréquences supérieures à 0.05 Hz. Celles-ci dissipent leur énergie principalement par déferlement, voire friction, tandis que leur transformation est régie par des transferts d'énergie non-linéaires. La présence de groupes dans les vagues incidentes génèrent des ondes longues dites infragravitaires (IG, fréquences  $< 0.05$  Hz) liées à ces groupes (bound). Contrairement à la bande incidente, l'énergie associée à ces ondes longues se dissipe relativement peu, de sorte que sous certaines conditions, les ondes IG peuvent dominer l'hydrodynamique à l'interface terre/mer. Les processus de leurs transformations en zone de surf et de jet de rive restent encore mal compris, notamment pour des conditions de houles énergétiques (BERTIN *et al.*, 2020 ; SENECHAL *et al.*, 2018 ; FIELDER *et al.*, 2015). Une meilleure compréhension de ces processus est toutefois essentielle pour anticiper les aléas littoraux, et limiter leurs impacts, notamment le long des côtes anthropisées. Cette étude présente un travail de modélisation de l'hydrodynamique associée à des groupes de vagues de tempête (XBEACH, modèle surfbeat) observées lors d'une campagne de terrain effectuée en Novembre 2022 sur la plage de Lacanau. Nous nous intéressons ici aux différentes paramétrisations ainsi qu'à la sensibilité des résultats à la bathymétrie. Par la suite étudié, cela nous permettra d'aborder la transformation des ondes IG en conditions de tempête, et l'influence de la présence d'ouvrage de haut de plage.

### 2. Matériel et méthode

#### 2.1 Site d'étude

Les données présentées ont été recueillies sur la plage de Lacanau, sur la côte atlantique sud (Figure 1). Cette plage, exposée à la houle atlantique, est caractérisée par un environnement méso à macrotidal. Cette plage à double barre porte un enrochement de 1 km de long. La barre interne affiche généralement une morphologie tridimensionnelle avec des systèmes barres-bâines de type Transverse Bar and Rip (WRIGHT & SHORT, 1984), tandis que la barre subtidale montre des formes en croissant. Les courants de marée sont relativement faibles par rapport aux courants induits par les vagues à Lacanau. L'impact des marées sur les vagues courtes se limite principalement aux fluctuations du niveau d'eau. Le régime de houle varie saisonnièrement, avec des hauteurs de vagues significatives ( $H_s$ ) et des périodes de pic ( $T_p$ ) variant de 1,1 m et 8,5 s en Juillet à 2,4 m et 13 s en Janvier, avec une direction dominante d'ouest-nord-ouest générant une dérive littorale du nord vers le sud (CASTELLE *et al.*, 2017).

## 2.2 Campagne de mesures et traitement des données

Une campagne de mesures s'est déroulée pendant six cycles de marée du 22 au 25 Novembre 2022, révélant des conditions de houle énergétique avec des Hs au large atteignant 6 m et une période pic de 20 s (données issues de la bouée Lège Cap Ferret du réseau CANDHIS). Des données de pression et de vitesse ont été collectées à une fréquence de 8 Hz le long de deux profils : un près d'un enrochement (profil sud) et un en amont de la dérive littorale dans une zone "naturelle" (profil nord) (aux positions relatives indiquées sur la Figure 1). Des images vidéo haute résolution (2 Hz) ont également été acquises au profil sud. Cette étude se concentre exclusivement sur les simulations associées au profil sud.

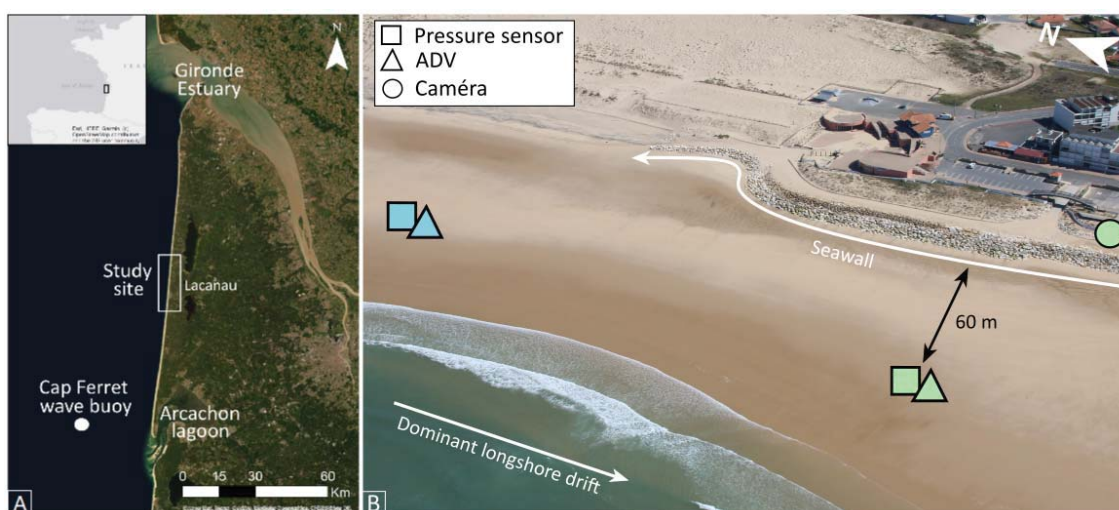


Figure 1. Localisation de la plage étudiée (A). Schéma du dispositif expérimental avec les profils nord (bleu) et sud (vert) (B), (Photo aérienne ©OCA database).

Les capteurs utilisés se trouvant en zone intertidale, ils étaient à l'air libre à marée basse, ce qui a permis de corriger la pression mesurée par les différents capteurs de la pression atmosphérique, les mesures entre deux marées basses ayant été interpolées linéairement. Après cette correction, une reconstruction hydrostatique de la profondeur est ensuite calculée en utilisant la hauteur du capteur par rapport au lit de sable, mesurée à chaque marée basse (érosion maximale sur toute la campagne de 13 cm au profil sud). Le signal de marée est obtenu en moyennant sur 20 minutes la hauteur d'eau, puis soustrait de la hauteur hydrostatique. Les effets non-hydrostatiques sur l'élévation de la surface libre sont évalués selon la méthode non-linéaire et faiblement dispersive de BONNETON *et al.*, (2018). Seules les données comportant un capteur immergé en continu ont été considérées. Les spectres de densité d'énergie d'élévation  $E(f)$  ont été calculés à l'aide de FFT (Fast Fourier Transform), avec une moyenne de 8 fenêtres de Hanning se chevauchant à 50 %. La moyenne quadratique de la hauteur d'onde (Hrms) a été calculée selon l'équation suivante :

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

$$H_{\text{rms}, f} = 2\sqrt{2} \sqrt{\int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} E(f) df} \quad (1)$$

où  $f_{\text{max}} = 0.05$  Hz et  $f_{\text{min}} = 0.005$  Hz définissent la bande de fréquences conservées pour les ondes IG.

Les séries temporelles d'élévation de surface des signaux entrants  $\eta^+$  et sortants  $\eta^-$ , ont été calculées suivant l'approche temporelle de GUZA *et al.*, (1984) :

$$\eta^{\pm} = \frac{\eta \pm \left(\frac{h}{g}\right)^{1/2} u}{2} \quad (2)$$

où  $h$  est la profondeur d'eau et  $g$  la constante d'accélération gravitationnelle. L'approche temporelle adoptée repose sur l'hypothèse de faible profondeur, en accord avec les fréquences et positions relatives des capteurs, et cohérente avec l'approche de modélisation de cette étude. Par la suite, le coefficient de réflexion est calculé tel que  $R = \eta^{+2} / \eta^{-2}$ .

### 2.3 Modélisation numérique

Des travaux de modélisation numérique ont été réalisés en utilisant XBeach, un système bidimensionnel combinant un modèle spectral pour simuler l'action des vagues à l'échelle des groupes et un solveur Saint-Venant pour la dynamique des ondes IG (ROELVINK *et al.*, 2009). Le mode surfbeat avec l'option singledir a été utilisé pour modéliser la dissipation de l'énergie due au déferlement des vagues, en utilisant le modèle de déferlement de ROELVINK (1993). Deux séries de simulations ont été effectuées avec un temps de calcul à l'unité avec 32 cœurs de 8h. La première série s'effectue avec le modèle initial et l'autre avec un coefficient de déferlement adaptatif (B) selon PEZERAT *et al.*, (2022). Dans cette dernière formulation, le taux moyen local de dissipation d'énergie par unité de surface dépend du facteur B qui peut être écrit tel que,  $B = 40 \tan\beta$  (avec  $\beta$  la pente locale du fond).

Une grille rectiligne centrée sur le profil cross-shore instrumenté, couvrant un linéaire côtier de 2500 m, a été utilisée avec une résolution spatiale de 2 m. Cette grille s'étend de l'enrochement jusqu'à 2400 m au large, couvrant des profondeurs d'eau allant jusqu'à environ 30 m à une résolution cross-shore variable, de 15 m à 0.5 m le long de la plage. Un relevé topographique (GNSS RTK) effectué le 22/11/22 est utilisé pour la partie haute de la plage (entre 30 et 100 m cross-shore sur la Figure 2c). Pour la partie basse (distance cross-shore supérieure à 150 m), deux bathymétries ont été reconstruites à partir de plusieurs sources de données. Une première bathymétrie a été reconstruite à partir du levé topographique Litto3D effectué par le SHOM entre le 30 Août et le 30 Octobre 2021 (Profil brut 2021 sur la Figure 2c). Une première bathymétrie appelée « Bathy 2021 » a ainsi pu être reconstruite (Figure 2a). Une seconde bathymétrie a par la

suite été reconstruite par inversion bathymétrique à partir de l'image satellite Sentinel-2 exploitable et temporellement la plus proche de cette campagne (Figure 2b). La méthode utilisée est celle de STUMPF *et al.*, (2003), une régression linéaire ( $R = -0.85$ ,  $rmse = 0.59$  m) a été définie entre le ratio des valeurs de réflectance des bandes verte et bleue issues de l'image du 5 septembre 2021, et du levé Litto3D. Les coefficients directeurs de cette régression ont ensuite été appliqués au ratio des valeurs de réflectance de l'image satellite du 11 Août 2022 (Profil brut 2022 sur la Figure 2c). Enfin une moyenne glissante 2D a été appliquée, afin d'obtenir les valeurs de bathymétrie correspondantes appelées « Bathy 2022 ».

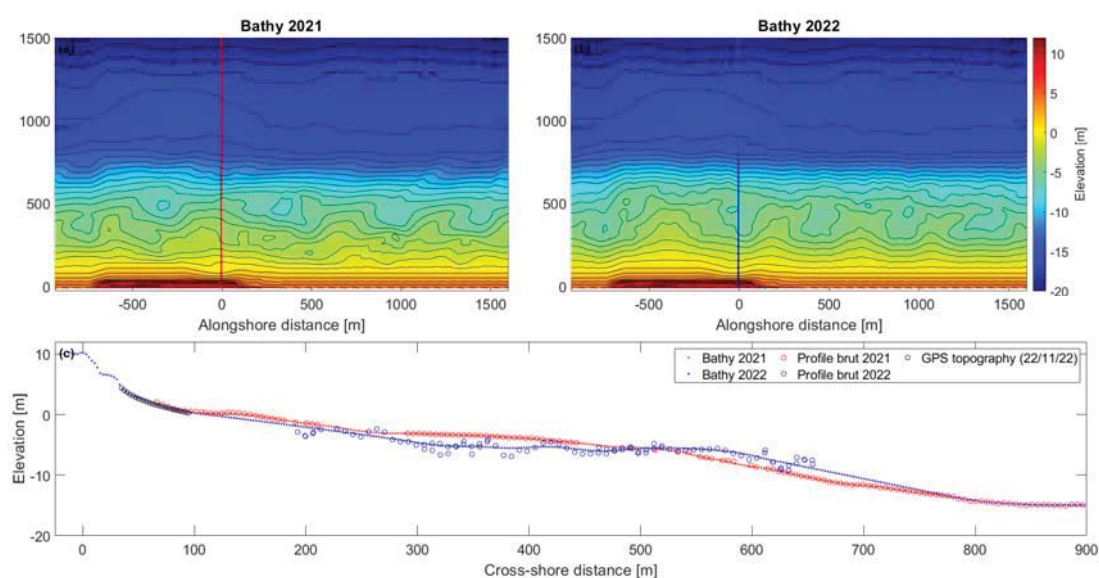


Figure 1. Bathymétries reconstruites de 2021 (a) et 2022 (b), différentes sources de données et profils reconstruits (c).

Le long de la limite au large, XBeach a été forcé avec des élévations de surface issues du modèle HYCOM2D et des spectres de JONSWAP générés à partir des observations effectuées par la bouée citée précédemment située au large de cette bande littorale. La calibration et validation du modèle est effectuées ici en utilisant deux marées contrastées. La première ayant les plus hautes hauteurs significatives observées ( $H_s = 5.23$  m et  $T_p = 13.78$  s) et la troisième marée ayant les plus faibles hauteurs et périodes observées ( $H_s = 4.28$  m et  $T_p = 10.79$  s).

### 3. Résultats et discussion

Lors de la première marée, les niveaux d'eau simulés à partir des deux bathymétries utilisées engendrent des niveaux d'eau inférieurs à ceux observés *in situ*, 2.6 m simulé avec les deux bathymétries contre 2.64 m observé *in situ* (Figure 3a). Concernant la troisième marée (Figure 3b), les niveaux d'eau simulés avec la bathy 2022 sont égaux à

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

ceux observés. Les niveaux d'eau obtenus avec un déferlement non adaptatif (non présentés ici) sont inférieurs pour les deux marées et bathymétries (excepté le cas de la marée 1 avec la bathy 2021 pour lequel il est supérieur).

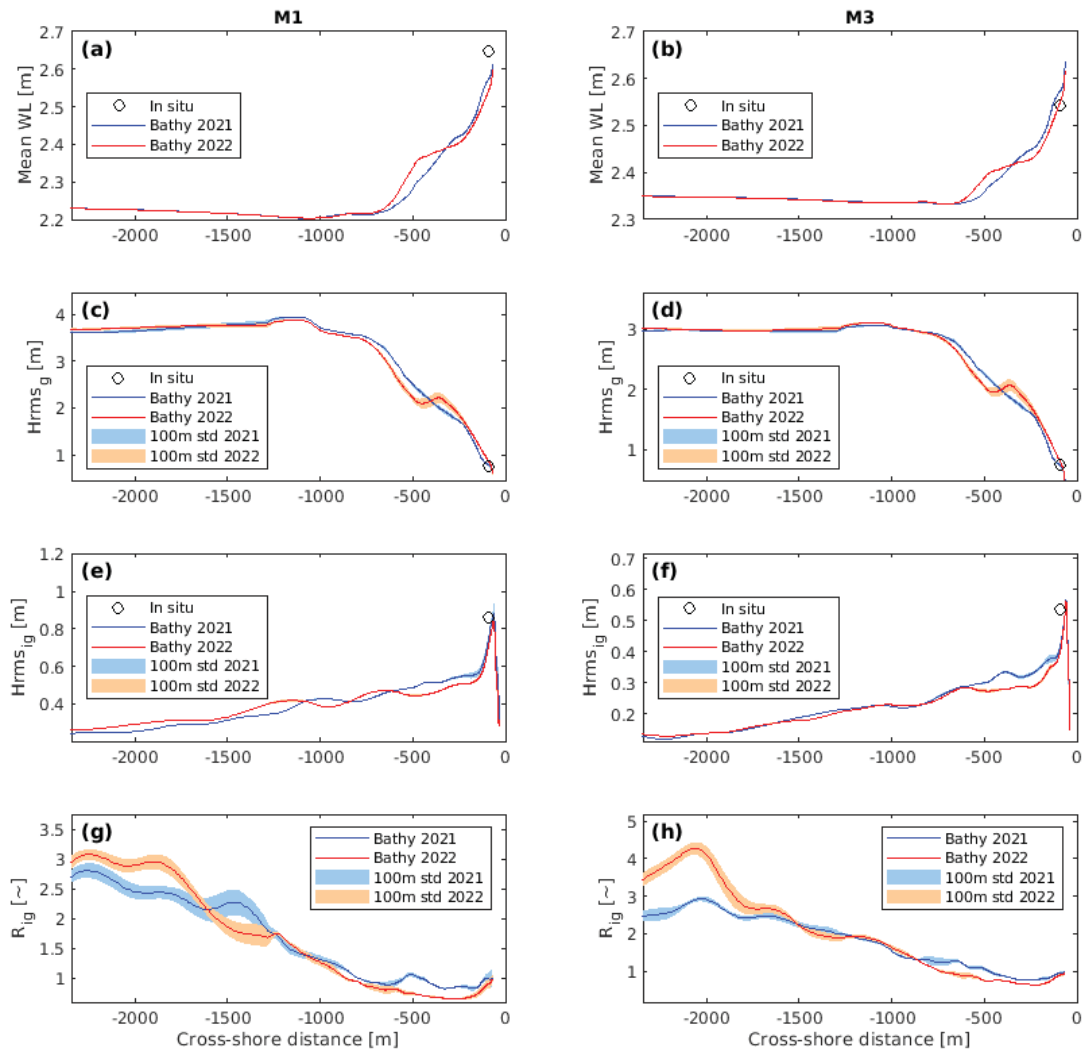


Figure 3 : (a) et (b) Niveaux d'eau, (c) et (d) Hrms gravitaires, (e) et (f) Hrms infragravitaires, et (g) et (h) coefficients de réflexion pour les marées 1 (à gauche) et 3 (à droite), simulés avec les bathymétries de 2021 (bleu) et de 2022 (rouge) ; les cercles noirs représentent les données mesurées, avec les zones colorées illustrant l'écart-type de la variabilité alongshore sur 100 m autour du profil moyen.

Les  $H_{rms}$  gravitaires obtenus pour les deux marées (Figure 3c et d) et bathymétries (rouge et bleu) atteignent les valeurs in situ observées de 0.76 m pour les marées 1 et 3. Les variations cross-shore des  $H_{rms}$  infragravitaires pour les deux marées (Figure 3c et d) et bathymétries (2021 et 2022, respectivement en rouge et bleu) ont des comportements différents. Les résultats modélisés à partir de la bathy 2022 sont

satisfaisants pour les deux marées (Figure 3e et f) avec des valeurs de 0.81 m et 0.46 m pour des valeurs observées de 0.86 m et 0.53 m, pour les marées une et trois, respectivement.

Les  $H_{rms}$  infragravitaires obtenues avec un déferlement non adaptatif (non présentées ici) ne sont pas satisfaisantes. Les valeurs obtenues avec la bathymétrie de 2021 sont de 0.65 m et 0.4 m pour les marées une et trois respectivement, et celles de 2022 de 0.7 m et 0.46 m, pour des valeurs observées de 0.86 m et 0.53 m.

Les coefficients de réflexion simulés sont très supérieurs aux valeurs observées *in situ* pour les deux bathymétries utilisées avec des valeurs de 0.99 et 0.90 et 0.96 et 0.90, pour les bathy 2021 et 2022, pour la première et la troisième marée respectivement (Figure 3g et h), quand des valeurs de 0.68 et 0.47, sont observées *in situ* lors des marées une et trois, respectivement. Le coefficient de réflexion décrit le ratio entre énergie entrante et sortante. Une étude supplémentaire de l'évolution *cross-shore* et *alongshore* de ces flux est l'objet de travaux en cours.

La variation *alongshore* 100 m autour du profil modélisé des  $H_{rms}$  gravitaires et infragravitaires ainsi que des coefficients de réflexion, est faible en zone de surf, comme le montrent les écarts type représentés sur la Figure 3. Une étude détaillée de la variabilité *alongshore* des coefficients de réflexion et du *runup* est également en cours afin d'étudier l'impact des parties hautes et basses de la plage sur sa variabilité.

#### 4. Conclusion

Les différentes paramétrisations des simulations numériques effectuées (choix de bathymétrie, modélisation du déferlement, etc.) ont permis de montrer que la bathymétrie dérivée par satellite peut être utilisée de manière robuste pour la simulation de la dynamique des vagues sur le littoral. L'utilisation d'un coefficient de déferlement adaptatif à la pente améliore la modélisation de ces événements énergétiques. Il serait toutefois nécessaire, pour une prochaine étude, de multiplier les points de mesure *in situ* le long de la distance *cross-shore* afin d'améliorer la calibration du modèle. Une exploitation plus approfondie des résultats de ces simulations numériques est nécessaire, notamment avec l'étude de l'évolution *cross-shore* des hauteurs d'ondes infragravitaires ainsi que leur variabilité *alongshore*. Dans un second temps une étude de la variabilité *alongshore* du *runup* sera également effectuée en relation avec un jeu de données vidéo collecté durant la campagne de mesures.

#### 5. Références bibliographiques

BERTIN X., MARTINS K., De BAKKER A., CHATAIGNER T., GUERIN T., COULOMBIER T., DE VIRON O. (2020). *Energy transfers and reflection of infragravity waves at a dissipative beach under storm waves*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(5), e2019JC015714. <https://doi.org/10.1029/2019jc015714>

## *Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière*

- BONNETON P., LANNES D., MARTINS K., MICHALLET H. (2018). *A nonlinear weakly dispersive method for recovering the elevation of irrotational surface waves from pressure measurements*. *Coastal Engineering*, 138, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.005>
- CASTELLE B., BUJAN S., FERREIRA S., DODET G., (2017). *Foredune morphological changes and beach recovery from the extreme 2013/2014 winter at a high-energy sandy coast*. *Marine Geology* 385, 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.006>
- FIELDER J., BRODIE K., McNINCH J., GUZA R.T. (2015), *Observations of runup and energy flux on a low-slope beach with high-energy, long-period ocean swell*, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9933–9941, doi:10.1002/2015GL066124
- GUZA R.T., THORNTON E.B., HOLMAN R.A. (1985). *Swash on steep and shallow beaches*. In *Coastal Engineering 1984*, 708-23. Houston, Texas, United States: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780872624382.049>
- PEZERAT M., BERTIN X., MARTINS K., LAVAUD L. (2022). *Cross-shore distribution of the wave-induced circulation over a dissipative beach under storm wave conditions*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC018108. <https://doi.org/10.1029/2021JC018108>
- ROELVINK J. (1993). *Dissipation in random wave group incident on a beach*. *Coastal Engineering*, 19:127–150. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90021-Y](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90021-Y)
- ROELVINK J., RENIERS A., VAN DONGEREN A., VAN THIEL DE VRIES J., MACCALL R., LESKINSKI J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- SENECHAL N., COCO G., PLANT N., BRYAN K.R., BROWN J., MACMAHAN J. H.M. (2018). *Field observations of alongshore runup variability under dissipative conditions in the presence of a shoreline sandwave*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6800-6817. <https://doi.org/10.1029/2018JC014109>
- STUMPF R.P., HOLDERIED K., SINCLAIR M. (2003). *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types*. *Limnology and Oceanography* 48, 547–556. [https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1\\_part\\_2.0547](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547)
- WRIGHT L.D., SHORT A.D. (1984). *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis*. *Marine Geology*, 56(1-4), 93-118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)